

# 商用飞机成本指数方法及其案例研究

## Case Study of Cost Index for Commercial Aircraft

王如华 叶叶沛 任启鸿 / Wang Ruhua Ye Yepai Ren Qihong

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

### 摘要:

成本指数功能是现代商用飞机设计中不可或缺的功能之一,是航空公司实际运营过程中节约成本的有效手段。描述了商用飞机成本指数和经济飞行速度的定义与计算方法,并选取了典型支线飞机作为案例,验证了该计算方法的正确性和实用性。可用于航空公司实际飞机运营和飞机制造商经济飞行速度功能的开发。

**关键词:**成本指数;经济速度;运营成本;商用飞机

**中图分类号:**F426.5

**文献标识码:**A

[Abstract] Cost index is one of the indispensable functions in modern commercial aircraft design. It's an effective way to save the cost for airlines. This paper describes the definition and calculation method of cost index and economic flight speed for commercial aircraft. A typical regional aircraft was chosen as a case study to verify the correctness and practicability of the method described in the paper. It is useful for aircraft operating of airlines and development of economic flight speed in aircraft manufactures.

[Key words] cost index; economy speed; operating cost; commercial aircraft

## 0 引言

飞行时间和飞行耗油是影响商用飞机运行成本的两个重要方面。一般而言,选择高的飞行速度,省时但费油;选择低的飞行速度,省油但费时。当油价上升时,省油的重要性会增加,趋向于选择低的飞行速度;反之,当油价下降时,省油的重要性会减弱,趋向于选择高的飞行速度。因此存在一个如何合理选择飞行速度的问题。

为此,现代商用飞机引入了“成本指数”<sup>[1]</sup>的概念。飞行员在飞行管理系统(Flight Management System,简称FMS)的控制显示器上输入事先计算得到的成本指数,飞机将依据成本指数和其他性能参数,计算出最低成本飞行的爬升、巡航和下降速度。当然,对于没有安装FMS系统的飞机,也可以利用成本指数来优化飞行计划。

## 1 成本指数定义与计算

### 1.1 成本指数定义

商用飞机直接运行成本(DOC)<sup>[2-3]</sup>的成本项目

可划分为以下三类:

(1)与时间有关的成本。包括财务成本(或租金)、维修成本中与飞行时间有关的部分以及取决于飞行时间的机组成本。飞行速度会影响飞行时间,从而影响飞行单位航程的时间成本。这类成本的单位是“元/小时(或分钟)”。

(2)燃油成本。取决于燃油价格和轮挡耗油。燃油价格的单位是“元/千克”。

(3)与起落(即飞行循环)有关的成本。包括导航费、机场费、地面服务费、餐饮费、民航建设基金、维修成本中与起落次数有关的部分以及与飞行时间无关的机组成本(包括基本工资和培训成本等)。这类成本与飞行时间(或速度)无关。

飞行速度的选择,对前两类成本产生影响,不影响第三类成本。将时间成本(元/分钟)与燃油价格(元/千克)之比定义为“成本指数”(Cost Index,简称CI),通常单位为“kg/min”。即:

$$\text{成本指数} \left( \frac{\text{千克}}{\text{分钟}} \right) = \frac{\text{与时间有关的成本}(\text{元/分钟})}{\text{燃油价格}(\text{元/千克})}$$

成本指数实质上表达了时间成本相对于燃油

价格的重要程度,这一特性使得它成为飞机速度优化的重要工具。

## 1.2 成本指数计算方法

燃油价格随市场而浮动,飞机的燃油成本和时间成本随航线而变化,理论上应该对每一条运营航线进行分析,确定其成本指数,并且定期更新。

### 1) 燃油价格

燃油价格和轮挡耗油是影响燃油成本的基本参数。虽然在成本指数中不出现轮挡耗油这个参数,但在后文推导经济速度的方程中的单位燃油航程(SR),体现了耗油特性的影响。耗油与机型、机龄、发动机燃油效率、维修状态、飞行高度、飞行重量和重心(涉及飞机诱导)等诸多技术因素有关。

### 2) 与时间有关的成本

时间成本可归纳为以下两类成本:与飞行时间有关的维修成本以及取决于飞行时间的机组成本。

#### (1) 与时间有关的维修成本

成本指数计算,应依据飞机的实际维修状态来确定与飞行时间有关的维修成本,飞机的新旧程度对维修成本影响较大。与飞行时间有关的维修成本通常是下述四项之和<sup>[4]</sup>:与飞行时间有关的机体维修劳务成本;与飞行时间有关的机体维修材料成本;与飞行时间有关的发动机维修劳务成本;与飞行时间有关的发动机维修材料成本。

#### (2) 与时间有关的机组成本

对于特定航空公司来说,确定与时间有关的机组成本或许并不困难。但要建立一个通用的计算模型,或许是不现实的。地区不同、航空公司的经营模式(网络航空、地区航空、低成本航空或民营航空)不同,飞机的吨位不同,飞行机组的工资和福利待遇会有一定差异。

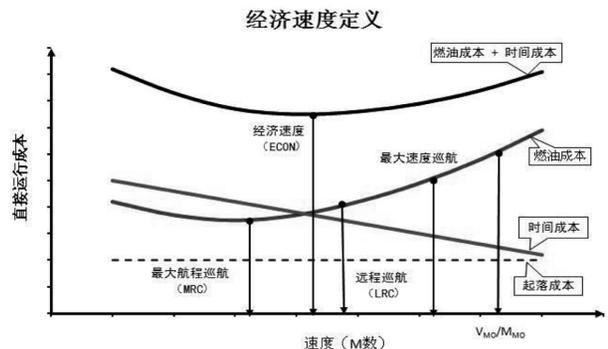
## 2 经济速度定义与计算

### 2.1 经济速度的定义

图1给出了三种类型成本随速度( $M$ 数)变化的示意曲线,还给出了“燃油成本+时间成本”的示意曲线(不包含与速度无关的起落成本)。首先来看燃油成本线上所标出的四种速度。燃油成本最低(即航段耗油最低)时的速度,对应于最大航程巡航(Maximum Range Cruise,简称MRC),该速度相对较低。“99%最低燃油”时的速度,对应于“远程巡航”(Long Range Cruise,简称LRC)。在远程巡航速

度时,耗油仅增加1%(或者说航程损失1%),但速度增加较多,通常被认为接近于经济速度。“最大巡航速度”(Maximum Cruise Speed)对应于使用发动机最大巡航推力所能达到的最大速度,该速度下的燃油成本将比较高,但时间成本较低。该速度是温度的函数,因为最大巡航推力与温度有关。最大使用速度(Maximum Operating Speed,  $V_{MO}/M_{MO}$ )是飞机任何情况下不可随意超越的速度,在下降时可能达到这一速度,该速度下的燃油成本将很高,时间成本降低。

根据成本指数的定义,当燃油成本的重要程度很高时(即燃油成本比时间成本高得多),成本指数将很低。在极端情况下(即时间成本可忽略不计), $CI=0$ ,所对应的速度就是最大航程巡航速度(MRC)。反之,当燃油成本相对于时间成本很低时,成本指数将很高。在极端情况下(即燃油成本可忽略不计),所对应的速度是最大飞行包线速度,对于巡航阶段,是最大巡航速度;对于下降阶段,是最大使用速度( $V_{MO}/M_{MO}$ )。



在实际运行中,这两种极端的CI值很少发生。航空公司基于它们的实际燃油价格和时间成本的构成,计算出CI。然后依据实际的CI确定出经济速度。最低成本经济速度(ECON Speed)定义为“燃油成本+时间成本”最低点对应的飞行速度。

### 2.2 经济速度计算方法

依据上一节的讨论,图1中“燃油成本+时间成本”曲线的最低点所对应的速度,就是最低成本经济速度(ECON Speed)。式(1)可描述“燃油成本+时间成本”曲线:

$$C = C_1 \times T + C_f \times F \quad (1)$$

式中, $C$ 为燃油成本+时间成本; $C_1$ 为单位时间成本,元/小时; $C_f$ 为燃油价格,元/千克; $T$ 为飞行时

间,  $h$ ;  $F$  为飞行耗油,  $\text{kg}$ 。

$T$  等于航程除以速度,  $F$  等于航程除以单位燃油航程, 式(1)改写为:

$$C = C_f \times (R / (aM)) + C_r \times (R / SR) \quad (2)$$

式中,  $R$  为航程,  $\text{km}$ ;  $M$  为飞行  $M$  数;  $a$  为音速,  $\text{km/h}$ ;  $SR$  为单位燃油航程 (Special Range),  $\text{km/kg}$ 。

显然,  $dC/dM=0$  时的  $M$  数对应于最低成本经济速度, 对式(2)取一阶导数并令其等于零, 于是得到:

$$dC/dM = (C_f R / a) \times (-1/M^2) + C_r R \times (-1/SR^2) \times (dSR/dM) = 0 \quad (3)$$

式(3)经整理后最终可得到描述  $C_r/C_f$  与经济  $M$  数关系的表达式(4), 式中,  $C_r/C_f$  即  $CI$ , 但应注意到这里  $C_r/C_f$  的单位是  $\text{kg/h}$ , 而  $CI$  的常用单位是  $\text{kg/min}$ :

$$C_r/C_f = -a_0 \theta^{0.5} M^2 / SR^2 \times (dSR/dM) \quad (4)$$

式中,  $a_0$  为海平面时的音速,  $1\,225\text{km/h}$ ;  $\theta$  为温度比。

### 3 案例验证

本文选取典型支线飞机进行案例分析, 验证成本指数方法是否真正实现总运营成本的降低。由于飞机在执飞航班时“与起落相关的成本”固定不变, 本文仅针对由于飞行速度引起的, “与时间相关的成本”和“燃油成本”的变化进行分析。

(1) 最低成本经济速度的计算步骤可概述如下: 在不同的飞行高度和飞行重量条件下, 利用性能计算工具计算出  $SR$  随巡航  $M$  数的变化, 本文不再赘述。案例机型的典型  $SR$  曲线如图 2 所示。然后利用式(4), 确定出最低成本经济速度和相应的  $CI$ , 如图 3 所示。

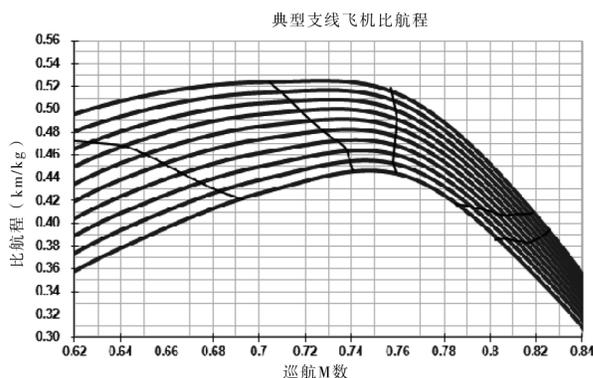


图 2 飞机典型 SR 曲线

典型支线飞机成本指数与经济飞行速度@38t

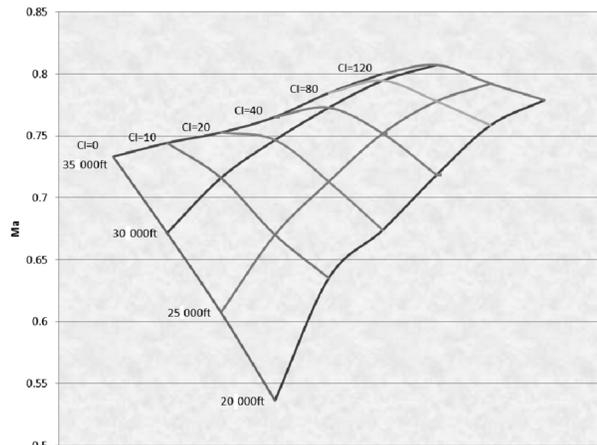


图 3 典型支线飞机巡航  $M$  数 (飞行重量 38t)

(2) 成本指数计算: 假设某航空公司实际运营案例机型过程中与时间相关的成本和燃油价格如表 1 所示, 据此可计算出航空公司实际运营此机型的成本指数。由于近年来燃油价格波动幅度较大<sup>[5]</sup>, 本文假设燃油价格为 6 元/千克, 综合上述分析, 可得出案例机型实际的运营成本指数约为 11.9 如表 2 所示。

表 1 典型支线飞机成本指数计算

与时间有关的成本, 元/轮挡小时	4 287
与飞行时间有关的维修成本, 元/轮挡小时	1 887
机体维修劳务成本	604
机体维修材料成本	465
发动机维修劳务成本	260
发动机维修材料成本	558
机组成本, 元/轮挡小时	2 400
燃油价格, 元/千克	6.0
成本指数, $\text{kg/min}$	11.9

(3) 结果验证: 根据上述成本指数选定的经济飞行速度是否使得运营成本最低

经济飞行速度选取: 假设飞机在 30 000ft 高度巡航, 巡航段距离为 500n mile。为了简化计算, 以巡航中点重量选取经济飞行速度 (注: 在实际飞行过程中, 随着重量变小, 经济飞行速度将略有降低, 但变化不大)。假设巡航中点重量为 38t, 根据图 3 可查出经济巡航  $M$  数为 0.72。

实际运营成本计算: 根据飞机性能 (图 2) 和实际经济运营环境 (表 1), 计算了  $M$  数为 0.6 ~ 0.86 的实际运营成本, 如表 2 和图 4 所示。可见, 在  $M$  数为 0.72 时实现了总运营成本最低。验证了上述经济速度计算方法的正确性和实用性。

(下转第 78 页)

[7] Andy P. Broeren, Sam Lee, Gautam H. Shah, Patrick C. Murphy. Aerodynamic Effects of Simulated Ice Accretion on a Generic Transport Model [J]. SAE International 2011 - 38-0065.

[8] Olsen, W., Takeuchi, D., and Adams, K.. Experimental Comparison of Icing Cloud Instruments [J]. AIAA 83-0026, Jan. 1983.

[9] 战培国,程娅红. 大型运输机结冰试验技术研究[J]. 航空科学技术,2011,1:13-15.

[10] 杜雁霞,桂业伟,柯鹏,王勋年. 飞机结冰冰型微结构特征的分形研究[J]. 航空动力学报,2011,26(5):997-1002.

[11] 陈年旭,桑为民,陈迎春,张彬乾. 民用飞机结冰研究相关技术及进展[J]. 飞行力学,2009,27(5):11-14.

[12] 王育平,马文彪,陶嫣红. 翼面结冰对飞行品质的影响分析[J]. 民用飞机设计与研究,2008,1:10-12.

[13] 杜雁霞,桂业伟,肖春华,易贤,李军. 飞机结冰过程的液/固相变传热研究[J]. 航空动力学报,2009,24(8):1824

-1830.

[14] 霍西恒,常士楠. 翼型表面粗糙度对结冰的影响分析[J]. 航空工程进展,2012,3(2):156-161.

[15] 丛成华,彭强,汪伏波,符澄. 基于粒子轨迹的结冰风洞收缩段优化设计数值模拟[J]. 航空动力学报,2012,7:1555-1562.

[16] 常士楠,杨秋明,李延. 翼型表面结冰准定常数值模拟[J]. 空气动力学学报,2011,29(3):302-308.

[17] 易贤,朱国林,王开春,桂业伟. 结冰风洞试验水滴直径选取方法[J]. 航空学报,2010,31(5):877-882.

[18] 易贤,朱国林,桂业伟. 一种改进的积冰试验相似准则及其评估[J]. 实验流体力学,2008,22(2):84-87.

[19] 赵克良,陆志良,丁力,等. 用于结冰风洞试验的混合翼设计[J]. 空气动力学学报,2013,31(6):718-722.

[20] 冯立静,张国友,许国山,李磊. 某结冰风洞有限元分析[J]. 低温建筑技术,2012,6:52-54.

(上接第 25 页)

表 2 不同巡航速度的运营成本计算

Ma	SR (km/kg)	Time (min)	Fuel (kg)	Time Cost (元)	Fuel Cost (元)	Total Cost (元)
0.60	0.441	84.8	2 100	6 062	12 602	18 664
0.62	0.447	82.1	2 071	5 866	12 425	18 292
0.64	0.451	79.5	2 053	5 683	12 316	17 999
0.66	0.453	77.1	2 043	5 511	12 260	17 771
0.68	0.453	74.9	2 043	5 349	12 256	17 605
0.70	0.452	72.7	2 051	5 196	12 303	17 499
0.72	0.448	70.7	2 068	5 052	12 405	17 457
0.74	0.442	68.8	2 095	4 915	12 568	17 483
0.76	0.434	67.0	2 134	4 786	12 804	17 590
0.78	0.421	65.3	2 198	4 663	13 190	17 853
0.80	0.400	63.6	2 313	4 547	13 879	18 426
0.82	0.368	62.1	2 519	4 436	15 111	19 547
0.84	0.324	60.6	2 858	4 330	17 147	21 477
0.86	0.274	59.2	3 384	4 229	20 301	24 531

不同巡航速度的运营成本计算

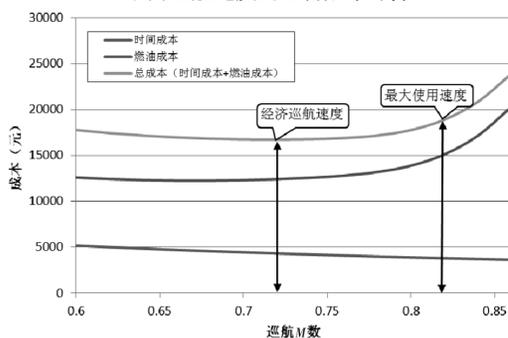


图 4 经济性飞行速度

根据表 2 和图 4,选取经济巡航速度 ( $M=0.72$ ) 和最大使用速度 ( $M=0.82$ ) 进行对比分析,可得:500nm 典型航段选取经济巡航速度飞行比最大使用速度飞行时间增加 8.6min,油耗减少 451kg,节约总成本约 2 090 元人民币。假设一个机队有 20 架飞机,每架机每年飞行 1 500 架次,则一个机队全年可节约成本 6 270 万元人民币,成本节约效果显著。

## 4 结论

本文一方面尝试从航空公司实际运营角度建立了商用飞机成本指数的计算方法,从飞机制造商角度建立了飞机经济速度的计算方法,并选取了典型支线飞机进行了案例计算,验证了其计算方法的科学性和正确性。另一方面,也进一步表面了航空公司实际生产过程中采用成本指数方法可使得成本节约效果显著,证明了其有效性和实用性。

## 参考文献:

[1] Boeing China Inc., Cost Index [R]. Jan. 2002.

[2] Stirling Dynamics Limited, Aircraft Direct Operating Costs and Cost Index Usage - Interim Study [J]. Dec. 2011.

[3] 叶叶沛. 民用飞机经济性[M]. 成都:西南交通大学出版社,2013:2-3.

[4] Liebeck, Robert H. et al. Advanced Subsonic Airplane Design & Economic Studies [J]. NASA CR-195443, April 1995.

[5] <http://www.zou114.com/youjia/qihuo.asp>